COSMOLOGIA: STRUTTURA ED EVOLUZIONE DELL’UNIVERSO

La **Cosmologia** è la scienza che ha come oggetto di studio l'universo nel suo insieme, ed in particolare ne vuole spiegare l'origine e l'evoluzione. La cosmologia ha le sue radici storiche nella narrazioni religiose riguardo l'origine di tutte le cose (cosmogonia) e nei grandi sistemi filosofici (come, ad esempio, il sistema tolemaico). Oggigiorno la cosmologia è una scienza che fa principalmente parte dell'astronomia, pur raccogliendo in sé diverse discipline e teorie anche al di fuori dell'astronomia stessa (ad esempio, la fisica delle particelle, la relatività generale, e molte altre).

L’origine della Cosmologia moderna

Si può affermare che la cosmologia moderna nasce fra il 1915 ed il 1929: nel 1915, infatti, **Einstein** pubblicò il primo articolo riguardo alla teoria della relatività generale, mentre nel 1929 **Hubble** scoprì la sua famosa legge, che implica che l'Universo è in espansione. Poco tempo dopo la pubblicazione della sua teoria (che "sostituiva" la gravitazione universale newtoniana), Einstein per primo la applicò al calcolo dell'evoluzione dinamica dell'universo. Gli fu subito evidente che, assumendo che la materia sia distribuita nell'universo in modo omogeneo, anche un universo infinito tenderebbe a collassare su sé stesso. Essendo però opinione comune che l'universo fosse statico (ed eterno), Einstein ricorse all'artificio di aggiungere nelle equazioni del campo gravitazionale una costante, detta **costante cosmologica**, per controbilanciare questa contrazione. Questa costante non modificava minimamente le predizioni della teoria in tutti gli altri campi, ma la sua introduzione si prestava ad un altro genere di critica. Infatti, esiste un *unico* valore della costante cosmologica che consente di avere un universo in equilibrio statico, ed anche in questo caso l'equilibrio risulta instabile; ciò significa che per avere un universo eternamente statico il valore "fisico" della costante cosmologica dovrebbe essere *esattamente* quello richiesto dalla condizione di staticità. Ogni altro valore, anche estremamente prossimo a quello indicato da Einstein, conduce ad un universo in collasso o in espansione. Nel 1922 il matematico russo **Alexander Friedmann** notò questo problema e, abbandonando l'ipotesi che l'universo sia statico (ed eterno), trovò che le soluzioni delle equazioni della relatività generale indicavano che l'universo avrebbe avuto un inizio in cui sarebbe stato infinitamente denso, e che da allora si sarebbe espanso; cinque anni dopo **Georges Édouard Lemaître** arrivò allo stesso risultato in modo indipendente. Sia Friedman che Lemaître trovarono anche che nel caso da loro esaminato (e comunemente accettato anche attualmente) di un universo omogeneo ed isotropo (accettando il principio cosmologico), la metrica che risolve le equazioni del campo gravitazionale è la cosiddetta metrica di Friedman-Lemaître-Robertson-Walker. L'insieme di questa metrica e delle soluzioni trovate da Friedmann e Lemaître costituiscono il cosiddetto **modello cosmologico di Friedmann-Lemaître**

Pochi anni dopo queste idee teoriche trovarono una clamorosa conferma sperimentale nella scoperta di Hubble che le galassie si allontanano da noi ad una velocità proporzionale alla loro distanza, la qual cosa può essere spiegata facilmente assumendo che l'universo si stia espandendo.

Le teorie del Big Bang e dello stato stazionario

L'idea che l'universo avesse un inizio portò alla formulazione della teoria del Big Bang, ovvero che l'universo sia nato da una singolarità gravitazionale in cui erano concentrati tutto lo spazio-tempo e la materia dell'universo; in particolare nel 1948 **Alpher, Bethe e Gamow** introdussero il cosiddetto modello αβγ, che spiegava come potesse avvenire la sintesi degli elementi chimici nell'ambito della teoria del Big Bang, ovverso in un universo in rapida espansione ed in raffreddamento. Tuttavia alcuni scienziati non accettarono l'idea di un universo che non fosse eterno e proposero modelli alternativi; fra questi il più famoso e fortunato fu la teoria dello stato stazionario di **Fred Hoyle,** in cui l'universo sarebbe eterno e la diluizione della materia dovuta all'espansione sarebbe bilanciata da una continua creazione spontanea di particelle (1948).

Per circa 20 anni la controversia fra i due modelli cosmologici fu alquanto accesa; essa giunse però ad una conclusione piuttosto rapida dopo che l'osservazione della **radiazione cosmica di fondo a microonde** (nel 1964 da parte di Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson) e diverse misure della densità dei quasar non portarono al quasi totale abbandono delle teorie alternative ed all'adozione quasi unanime di quelle basate sul Big Bang. Secondo questo la materia nell'universo è omogenea e isotropica e lo spazio tempo può essere distorto per effetto gravitazionale solo in tre modi:

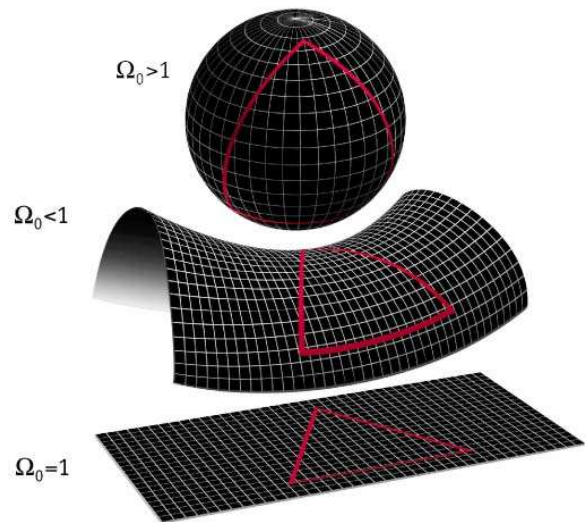
A. **curvatura positiva ($\Omega_0 > 1$), finito**
B. **curvatura negativa ($\Omega_0 < 1$), infinito**
C. **piatto ($\Omega_0 = 1$), infinito**

Attenzione: la curvatura positiva, negativa o l'essere piatto sono attributi che non si riferiscono al suo aspetto reale! Sono delle proprietà geometriche. In particolare, in un Universo "positivo" e finito la somma degli angoli interni di un triangolo è > 180°, in quello "negativo" è < 180° ed in quello piatto è = 180°. Perciò un Universo piatto non si presenta come un foglio di carta sottile: significa solo che in esso le distanze tra i vari oggetti si misurano applicando le comuni regole della geometria Euclidea.

$\Omega_0 > 1$

$\Omega_0 < 1$

$\Omega_0 = 1$

La materia gioca dunque un ruolo fondamentale nel determinare la geometria dell'Universo.
Tutta la materia attualmente presente nell'Universo al tempo del Big Bang aveva temperatura altissima e densità infinita! E' utile ricordare alcune cose, per evitare dei luoghi comuni sul Big Bang:

1. il Big Bang non è avvenuto in un solo punto dello spazio come un'esplosione. E' meglio pensarlo come l'apparizione simultanea dello spazio in tutto l'Universo. Infatti se l'Universo è infinito, è nato infinito. Solo se esso fosse finito, avrebbe avuto all'inizio volume nullo e si sarebbe espanso da li.
2. Per definizione l'Universo racchiude tutto lo spazio ed il tempo come lo conosciamo, quindi non è interesse del Big Bang stabilire dentro che cosa avviene l'espansione
3. Non è interesse del Big Bang stabilire cosa ha dato origine al Big Bang stesso

Inflazione e materia oscura

Per quanto dopo il 1970 il modello del Big Bang sia rimasto praticamente senza serie alternative, esso presentava e presenta alcune rilevanti lacune. Entrambe queste lacune emersero poco dopo la scoperta della radiazione di fondo, e riguardavano l'estrema uniformità su tutto il cielo della radiazione stessa:

1. il primo problema (***problema dell'orizzonte***) è che nei modelli standard del big bang due regioni di cielo sufficientemente lontane fra loro (ad una distanza angolare superiore a circa un grado) non possono essere entrate in contatto fra loro prima dell'epoca alla quale la radiazione di fondo è stata emessa, per cui non possono aver raggiunto un equilibrio termico alla medesima temperatura; sarebbe quindi logico attendersi disomogeneità molto più accentuate nella radiazione che osserviamo;
2. il secondo problema è che nella teoria originale del big bang le fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo sono molto più piccole di quanto sarebbe necessario per spiegare la formazione delle galassie in un tempo più breve dell'età dell'Universo.

Per risolvere il problema dell'orizzonte è stata introdotta un'idea teorica nota come **inflazione**, secondo la quale subito dopo il Big Bang l'universo avrebbe attraversato una fase di espansione estremamente accelerata (l'inflazione, appunto); due regioni di cielo estremamente lontane fra loro potrebbero quindi essere state in contatto (ed avere avuto il tempo di entrare in equilibrio termico) *prima* dell'inflazione. L'inflazione darebbe inoltre conto di numerose osservazioni (ad es. la *piattezza* dell'universo) altrimenti difficili da spiegare.
Per quel che riguarda la crescita delle fluttuazioni fino a formare le galassie, la soluzione comunemente accettata è che esista la cosiddetta materia oscura, ovvero una forma di materia che non abbiamo ancora osservato in quanto sarebbe elettricamente neutra (e quindi non sarebbe in grado di emettere od assorbire luce); la fisica delle particelle fornisce diversi tipi di particelle di cui la materia oscura potrebbe essere costituita, ad es. i neutrini, o più probabilmente i cosiddetti WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*, particelle massive debolmente interagenti). Poiché la materia oscura non sarebbe influenzata dalla radiazione di fondo, essa ha potuto iniziare il suo collasso gravitazionale (dal quale sarebbero nate le galassie) molto prima della materia normale (barionica), eliminando quindi il problema del tempo di formazione delle galassie. Anche la materia oscura spiegherebbe diverse altre osservazioni, fra cui le misurazioni delle curve di rotazione delle galassie, che furono il motivo per cui fu originariamente introdotta.
Inflazione e materia oscura sono ormai entrate a far parte del cosiddetto "**modello standard**" della cosmologia, ovvero il modello accettato dalla maggior parte della comunità scientifica. Tuttavia entrambe non sono ancora considerate dimostrate, anche se ci sono concrete speranze di poter giungere ad una scoperta decisiva (ad esempio l'individuazione della particella elementare che costituirebbe la materia oscura) in tempi non troppo lunghi. D'altra parte, esistono anche alcuni sostenitori di teorie alternative, ad esempio delle cosiddette *teorie MOND* (da *Modified Newton Dynamics*), che eliminerebbero questi problemi (il particolare il secondo) introducendo delle modifiche alla teoria della gravitazione: queste teorie godono di scarso seguito ma non possono essere del tutto escluse.

Energia oscura e problemi aperti

Il problema forse più importante che affligge il modello del Big Bang è attualmente quello della cosiddetta *energia oscura*. Infatti alla fine degli anni '90 alcune misure di Supernovae hanno appurato che, contrariamente a quanto atteso, l'espansione dell'universo non sta rallentando, bensì accelerando. Per quanto la relatività generale fornisca un meccanismo (lo stesso che viene utilizzato da alcuni decenni per spiegare l'inflazione) attraverso il quale è possibile avere forme di energia che producono una gravità repulsiva, questa scoperta ha colto di sorpresa la maggior parte dei cosmologi. Al momento attuale non esiste una teoria che possa spiegare in maniera soddisfacente da cosa derivi l'energia (subito battezzata *energia oscura*) che sarebbe responsabile di questa accelerazione, e che sarebbe la forma dominante di energia nel nostro universo (la sua densità sarebbe infatti oltre 10 volte superiore a quella della materia normale e oltre 2 volte superiore a quella della materia oscura).

Nella cosmologia attuale restano aperte molte questioni riguardanti gli istanti iniziali dell'universo, quando la densità è confrontabile con la densità di Planck e gli effetti quantistici diventano importanti. Per fornire dati utili a restringere il campo di accettabilità delle teorie per quanto riguarda le fasi iniziali dell'evoluzione dell'universo saranno utili le nuove finestre osservative basate su *messaggeri* che possano attraversare la materia anche quando questa sia opaca alla radiazione, ad esempio i neutrini e, se saranno rilevate, le onde gravitazionali.

Un altro problema ancora aperto di estremo interesse per la cosmologia è la formazione delle strutture, a tutte le scale, da quella dei superammassi di galassie, a quella galattica, a quella planetaria.

Quale sarà il destino dell'Universo?

Il destino dell'universo dipende dall'esito della lotta tra espansione e gravità. Se la densità dell'Universo è inferiore a quella critica (legata a $\sqrt{H_0}$), allora l'Universo continuerà ad espandersi. Se invece la densità di materia dell'Universo supera quella critica, allora l'Universo probabilmente tornerà in futuro a contrarsi in un Big Crunch finale.
Le osservazioni attuali condotte recentemente evidenziano una densità di materia vicino a quella critica. Sembra dunque che il nostro Universo sia spazialmente piatto e se, come si suppone, i 7/10 della materia sono nella forma di energia oscura, allora continuerà la sua espansione per sempre.